Versuche über Schallmessung.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

hohen naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Eberhard-Karl-Universität Tübingen

vorgelegt

von

Julius Freiherr von Hornstein

aus München.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

Berlin.

Buchdruckerei von Gustav Schade (Otto Francke)

Linienstrasse 158.

Von der Fakultät angenommen am 14. Juni 1899.

Einleitung.

Bei der grossen Vollkommenheit, welche Messinstrumente jeder Art durch die physikalische Forschung erhalten haben, muss es uns Wunder nehmen, dass für die Messung von Schallwellen keine Methode und kein Apparat vorhanden ist, der weitergehendere Verwendung gefunden hätte.

Wohl haben sich in Erkenntnis dieses Mangels zeitweilig bedeutende Forscher mit dieser Aufgabe beschäftigt, aber Fragen wie z. B. welche Schwächung erfährt der Schall beim Durchgang durch nicht-homogene Medien oder wie gross ist die Luftbewegung in einem Raum einmal, wenn die Schallwellen Gelegenheit haben, ungehindert einzudringen, das anderemal, wenn irgend welche Hindernisse den Weg versperren, Fragen dieser Art haben keine experimentelle Beantwortung erfahren.

Die Entscheidung hierüber blieb nach wie vor unserem natürlichen Messinstrument, dem Ohr, überlassen, dessen zweifelhafte Kompetenz schon daraus hervorgeht, dass es wohl zwischen zwei gleich hohen Tönen den stärkeren einigermassen genau zu bestimmen weiss, indess bereits bei zwei

gleich starken Tönen von verschiedener Höhe dem höheren eine grössere Intensität beilegt.

Stellen sich also, so müssen wir uns fragen, der absoluten Wertbestimmung wirklich so grosse Schwierigkeiten entgegen? Und wenn auch, muss uns nicht allein schon die Möglichkeit einer objektiven Vergleichung wertvolle Aufschlüsse liefern?

Jedenfalls verlohnt es sich diesen Fragen näher zu treten, was der Zweck vorliegender Schrift ist.

§ 1. Die ersten Versuche zur Schallmessung knüpfen sich an den Namen W. Weber[1]), welcher die Ströme, die ein klingender Magnetstab in einer Induktionspule hervorbrachte, mit seinem Bifilardynamometer mass.

Die spätere Erfindung des Telefons schien diesem Grundgedanken, akustische Schwingungen in messbare elektrische zu verwandeln, eine auf die Behandlung akustischer Fragen anwendbare Form zu geben.

Aber erst durch A. Oberbeck[2]), welcher als schallempfangenden Körper das viel stärkere Ströme liefernde Mikrofon benutzte, fand dieses Prinzip zur Lösung der die damaligen Physiologen[3])

---

[1]) W. Weber, Elektrodynamische Massbestimmungen. Leipzig 1846, p. 89 ff.

[2]) A. Oberbeck, Untersuchungen über die Schallstärke. Wied. Ann. 13, p. 222—254. 1881.

[3]) Schafhäutl, Abhandl. d. bair. A. d. W. Bd. VII p. 501, 1855. Vierordt, Wied. Ann. Bd. 17, p. 471, Bd. 18, p. 201, Bd. 21, p. 509. Tischer, Wundt ebenda u. a.

vielbeschäftigenden Frage Verwendung, nämlich welche Energie zur Erzeugung eines Schalles aufzuwenden sei.

Die geringe Intensität der Wechselströme veranlasste übrigens A. Oberbeck, aus Mangel an einem hinlänglich empfindlichen Dynamometer die Zunahme des mittleren Widerstandes während der Schwingungen durch die ballistischen Ausschläge eines Galvanometers in einer Wheatstone'schen Brückenkombination zu messen.

Die direkte Messung griff G. Stern[4]) auf und suchte sowohl durch Verbesserung des Mikrofons für diesen Zweck als auch durch Erhöhung der Empfindlichkeit des Elektrodynamometer, die Methode für die Bestimmung von Maxima und Minima, wie sie in geschlossenen Räumen durch Interferenz entstehen, auszubauen. Weitere Versuche in dieser Richtung sind nicht bekannt.

Einen anderen Weg haben Grimsehl[5]) und M. Wien[6]) eingeschlagen. Ersterer basiert auf einer von Lord Rayleigh[7]) gemachten Wahrnehmung, wonach sich ein leicht drehbar aufgehängtes Blättchen im Innern einer Luftsäule senkrecht zu der

---

[4]) G. Stern, Über mikrofonische Tonstärkemessung. Inaug.-Diss. Leipzig 1890.

[5]) E. Grimsehl, Tonstärkemess. Separatabdruck aus dem Osterprogramm d. Johannaeums. Hamburg 1888.

[6]) M. Wien, Über die Messung d. Tonstärke. Inaug.-Diss. Berlin 1888.

[7]) Rayleigh, Phil. Mag. Serie V, Bd. 14.

Bewegungsrichtung der Luft zu stellen sucht, sein Instrument zur Tonstärkemessung.

Aber dieses sowohl, wie die Wien'sche manometrische Kapsel — ein Apparat, bei welchem die in einem Helmholtz'schen Resonator verstärkten Bewegungen einer Aneroidplatte durch eine empfindliche Spiegelvorrichtung dem Auge sichtbar gemacht werden — kommen für unseren Zweck nicht in Betracht, da sie eine direkte Beobachtung des Tonempfängers verlangen nnd deshalb zum Einbau in ein Gehäuse sich nicht eignen. Wir sind daher auf das Mikrofon angewiesen.

§ 2. Wir verstehen darunter eine Vorrichtung, die von Schall erregt, den von einer galvanischen Kette gelieferten Strom durch Änderung des Widerstandes im Stromkreis rythmisch modifiziert. Dies wird erreicht durch zwei oder mehrere sich leise berührende Kontakte. Dieses Prinzip ist allen Konstruktionen gemeinsam. Zur Verstärkung der Wirkung sind die gewöhnlich aus Kohle bestehenden Kontakte mit Resonatoren verbunden, welche meist in der Form elastischer Platten angewandt werden. Diese Resonatoren verstärken aber nicht jeden Ton gleichmässig, vielmehr jeden verschieden, ihren Eigenton sogar oft lästig stark. Trotz dieses Übelstandes lässt sich ihre Mitwirkung nicht entbehren. Versuche, ein membranloses Mikrofon zu erhalten, verliefen daher ungünstig. Wohl gaben die in einem Gazebeutel eingeschlossenen, stromdurchflossenen Kohlenkörner die Töne einer Pfeife

mit der grössten Reinheit in einem entfernten Telefon wieder, doch war die Stärke des übertragenen Tones, wie vorauszusehen, eine äusserst geringe. Es ist daher am besten, man greift zu einer in der Praxis wohlbewährten Konstruktion. Als solche stand mir ein Kohlenkörnermikrofon von Berliner[8]) zur Verfügung. Den Hauptbestandteil dieser Konstruktion bilden die Kohlenkörner, die von einem Filzcylinder zusammengehalten, den mikrofonischen Kontakt zwischen einer leitend gemachten Glimmerplatte einerseits und dem am Deckel des Gehäuses befestigten Kohlenblocke andererseits herstellen.

Die Vielheit der Kontakte und deren leichte Beweglichkeit setzen das Instrument naturgemäss den mannigfaltigsten Störungen aus, von denen die hauptsächlichste von Erschütterungen herrührt, indes auch Temperaturschwankungen und nicht zum geringsten Nebengeräusche vermögen die Beobachtung bedeutend zu beeinträchtigen.

Bei der Schwierigkeit, diese Bedingungen zusammen auch nur einigermassen genau einzuhalten, ist es nicht verwunderlich, dass über die innere Wirkungsweise des Körnermikrofons gegen Töne verschiedener Schwingungszahlen so gut wie nichts bekannt ist, obwohl die jüngste Zeit gerade für das Studium der Eigenschaften eines Kohärers, also auch der akustischen, ein fieberhaftes Interesse bekundete.

[8]) Universal Transmitter v. Berliner. Electr. Z. 8 p. 375. 1887.

Das Messen mit dem Mikrofon macht nämlich diese Kenntnis zur Voraussetzung oder verlangt eine Methode, die während der Messung diese Eigenschaften offenbart.

Wir werden später eine solche Methode kennen lernen.

Zunächst interessiert es uns nur, ob das Mikrofon sich in dieser komplizierten Form überhaupt zur Schallmessung eignet. Diese Frage ist, wie die Vorversuche ergaben, zu bejahen, da die Forderung, dass nach Aufhören der Schwingungen wieder der vorherige Ohm'sche Widerstand bei gleichartiger Erregung eintritt, sich unter entsprechenden Bedingungen erfüllen lässt.

§ 3. Die Wechselströme, die bisher gemessen wurden, sind die durch die periodischen Widerstandsveränderungen der Kohlenkontakte in dem sekundären Kreise einer Induktionsspule erregten, d. h. dieselben, welche bei der gebräuchlichen Fernsprechschaltung das Telefon zum Tönen bringen.

Nach einer Angabe von Bosscha[9]) genügen zur Hervorbringung eines deutlichen Tones im Telefon alternirende Ströme von der Stärke

$$7{,}7 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{cm}^{1/2}\ \mathrm{gr}^{1/2}\ \mathrm{sec}^{-1}.$$

Es wäre daher von dem zu verwendenden Wechselstrom-Instrument zum mindesten eine gleiche Empfindlichkeit zu erwünschen. Solche

[9]) Bosscha, Arch. Neerlauss 13, p. 250. 1878; Beibl. 2, p. 513. 1878.

Instrumente giebt es aber nicht. Die Trägheit der schwingenden Drahtspule und die Art der Dämpfung — meist durch Flüssigkeiten — drücken die Empfindlichkeit gegen schwache Ströme unter das geforderte Mass herab.

Das von mir benutzte Fröhlich'sche[10]) Dynamometer zeigte Ströme von der Grössenordnung

$$13 \cdot 10^{-6} \text{ gr}^{1/2} \text{ cm}^{1/2} \text{ sec}^{-1}$$

an. Durch Einschiebung eines unterteilten Eisenkernes lässt sich die Empfindlichkeit steigern und indem die quadratische Wirkungsweise modifiziert wird (bei gegebener Skala), auch das Messbereich vergrössern; eine Auswertung der Konstanten mittelst Gleichstromaichung ist aber dadurch nicht mehr möglich. Da für uns nur relative Messungen in Frage kommen, blieb der Eisenkern in Verwendung.

§ 4. Es fragt sich nun, ob die Einschränkung, welche die Methode durch das weniger empfindliche Instrument erfährt, sich nicht anderweitig verbessern lässt. Dies gelingt, wenn wir eine andere Anordnung treffen. Wir brauchen nur die Zuführungsdrähte des Dynamometers in den Nebenschluss zum Mikrofon zu legen. Die Schaltung sieht dann so aus, wie die Fig. 1 schematisch zeigt.

Die Stromquelle A bestand aus einer Akkumulatorenbatterie von 2 Zellen.

Ein regelbarer Widerstand w gestattet die Stromstärke beliebig zu verändern. Von den

[10]) Elektr. Z. Heft 1, p. 14—15. 1881.

Klemmen des Mikrofons M zweigt die Nebenleitung zum Messinstrument D ab. Eine einfache Umschaltevorrichtung ermöglicht zu Hörversuchen die Benutzung eines in einem entfernten Raume untergebrachten Siemens'schen Telefons.

§ 5. Bei Schliessung des Hauptstromes erfährt das Dynamometer eine konstante Ablenkung. Die Grösse derselben hängt bei gegebenem Ruhewiderstand des Mikrofons nur von der herrschenden Stromstärke ab. Diese nimmt man thunlichst gross. Eine Überschreitung der zulässigen Stromstärke, d. h. des Momentes, in dem eine Erwärmung der Kohlenkontakte erfolgt, giebt sich dadurch kund, dass kein Ruhepunkt für die bewegliche Dynamometerspule eintritt, sondern bei der Beobachtung durch das Fernrohr die Skala zu wandern beginnt. Bemerkenswert ist die hierbei auftretende grosse Empfindlichkeit für hohe Töne und die kleinsten Geräusche.

Steigt die Temperatur des Raumes oder bringt man einen erwärmten Körper unter das Mikrofon, so wächst der konstante Ausschlag.

Eine Abnahme dagegen findet statt, wenn wir das Mikrofon erschüttern.

Die Vergrösserungen oder Verkleinerungen des konstanten Ausschlages resultieren aus einer proportionalen Vergrösserung oder Verkleinerung des Mikrofonwiderstandes; die fortgesetzte Beobachtung des ersteren ist daher eine fortwährende Kontrolle für den letzteren.

Die konstanten Ausschläge waren übrigens bei einem Mikrofonwiderstand von ca. 30 Ω und einem Dynamometerwiderstand von 241 Ω so gering, dass von einer Kompensierung durch die zweite feststehende Dynamometerspule Abstand genommen werden konnte.

§ 6. Die Aufgabe, mit der wir uns befassen, bringt es mit sich, den Schallempfänger in ein Gehäuse einzuschliessen, das dem Ton gar nicht oder nur von einer bestimmten Seite her Einlass gewährt. Die Bedingung des vollständigen Abschlusses ist hierbei nur die Probe für die letztgenannte Forderung und muss ihr vorausgehen.

Ich glaubte anfangs ein hinlänglich tondichtes Gehäuse zu erhalten, wenn ich nur die Dicke der schalldämpfenden Schicht genügend gross mache. So brachte ich in einer starken Holzkiste eine zweite, kleinere derartig an, dass zwischen beiden sich überall ein Abstand von 5 cm befand. Dieser Zwischenraum wurde mit Watte sorgfältig ausgefüllt. Das Mikrofon erhielt seinen Platz im Innern auf einer Schlauchunterlage, um Erschütterung und Leitung abzuschwächen.

Bei den Versuchen zeigte sich nun, dass die Schalldämpfung eine sehr geringe und die Verwendung von Holz und grösseren Flächen ein Missgriff war.

Eine zweite, würfelförmige Kiste von 18 cm Seitenfläche aus 5 cm dickem Fichtenholz gab das gewünschte Resultat erst, nachdem sie innen und

aussen mit 2 mm dicken Bleiplatten belegt und sorgfältig verlötet wurde. Dieses Ergebnis führte endlich zu folgender Konstruktion. Fig. 2.

Durch Bleiguss wurde ein beiderseitig offenes cylindrisches Gefäss hergestellt. Etwas über der Mitte senkrecht zu seiner Axe wird dasselbe durch eine Einschnürung in zwei von einander getrennte Räume (A u. B) geteilt. Der obere, A, nimmt das Mikrofon auf. Ein Bleideckel, der durch 4 Schrauben auf die gut bearbeiteten Auflagerflächen sich pressen lässt, schliesst ihn nach aussen tondicht ab. Der Schall gelangt daher zum Mikrofon nur durch den unteren Raum, der sich schalltrichterförmig bis zum unteren Ende erweitert. Auch dieses lässt sich durch einen Bleideckel abdichten, was zu dem Zwecke geschah, um die Undurchdringlichkeit für die Schallwellen darzuthun. Dass bei derartig geschlossenem Apparat diese Eigenschaft vollkommen erreicht wird, zeigt sowohl das Messinstrument durch seine absolute Ruhe als auch das Telefon durch gänzliches Schweigen.

Der Apparat wurde vermittelst der am Deckel angebrachten Ösen an Stricken an einem in einer Grundmauer verankerten Balken etwa 2 m über dem Boden aufgehängt. Die vertikale Lage des Schallempfängers wird durch das Körner-Mikrofon bedingt, das nur in dieser Stellung Dienst thut.

§ 7. Es erübrigt uns noch mit ein paar Worten die Tonquelle zu besprechen. Als solche dienten mir gedakte Holzpfeifen. Ein verschiebbarer Stempel

gestattet jedes Intervall zwischen den Tönen e′ und g″ herzustellen. Ein mit dem Stempel parallel geführter Zeiger markiert auf einer aussen angebrachten Skala den der jeweiligen Stempelstellung entsprechenden Ton. Der Ton a′ machte 440 Schwingungen, die benutzten Töne bewegen sich daher zwischen den Schwingungszahlen 330 und 825. Das Anblasen der Pfeifen geschah mittelst eines Blasebalges, der von Hand aufgezogen, beim Loslassen unter dem beschwerenden Gewicht niederging. Bei seiner geringen Grösse war es nicht möglich, die Druckluft so lange konstant zu erhalten, bis sich das schwach gedämpfte Dynamometer ruhig eingestellt hätte. Ich beschränkte mich daher die grössten Ausschläge zu notieren, indem diese mit den zu erwartenden in einem ganz bestimmten Verhältnis stehen.

Auch Glaspfeifen kamen gelegentlich zur Verwendung. Sie gaben die Oktave vom zwei- bis zum dreigestrichenen d. Die Luft erhielt die Pressung von einem Gasometer und die Gleichmässigkeit ihrer Bewegung durch zwei eingeschaltete Luftreservoirs.

Versuche.

Zunächst beobachtete ich die Intensitätsänderung, welche der Schall erfährt, wenn man die Tonquelle vom schallempfangenden Mikrofon entfernt.

Zu diesem Zwecke wurde die Pfeife an einem Stativ befestigt, das eine leichte Einstellung auf bestimmte Entfernungen in der Richtung des Hauptstrahles gestattete.

Die genommenen Entfernungen betragen 100 bis 400 mm von der Pfeifenöffnung an gerechnet bis zum untern Rand des Apparates.

Die erhaltenen Resultate sind in den folgenden Tabellen niedergelegt.

Hierin bedeutet:

σ_0 den konst. Ausschlag, entsprechend dem jeweiligen Mikrofon-Widerstand

σ_1 den von der Schallerregung herrührenden grössten Ausschlag

σ'_0 den konst. Ausschlag nach der Schallerregung

μ den Mittelwert der grössten Ausschläge. Da der erste Ausschlag einer neuen Reihe oft unsicherer ist, als die folgenden, so wurden die mit Klammern versehenen Zahlen zur Berechnung von μ nicht herangezogen.

Tabelle No. I.

Abstand 400 mm. Nullp. 470.

Ton	σ_0	σ_1	σ'_0	$\sigma'_0-\sigma_1$	μ	Ton	σ_0	σ_1	σ'_0	$\sigma'_0-\sigma_1$	μ
g''	432	340	432	92		b'	405	356	405	49	
	431	341	431	90			405	354	405	51	
	431	339	431	92	91,3		405	358	405	47	49
f''	429	337	427	90		a'	404	317	402	85	
	427	333	427	94			402	318	402	84	
	427	334	427	93	92,3		402	319	402	83	84
e''	422	336	422	(86)		as'	402	332	396	(64)	
	422	337	422	85			396	320	396	76	
	422	337	422	85	85		396	320	396	76	76
es''	419	351	419	68		g'	397	268	397	129	
	418	350	417	67			397	267	396	129	
	417	348	417	69	68		395	267	395	128	128,7
d''	417	316	417	(101)		ges'	395	277	395	118	
	415	317	414	97			395	278	395	119	
	414	317	414	97	97		395	277	395	118	118,3
des''	414	362	414	52		f'	395	297	393	96	
	414	362	414	52			393	293	393	100	
	413	358	413	55	53		393	297	393	96	97,3
c'	410	333	408	(75)		e'	392	254	392	(138)	
	408	336	407	71			392	261	392	131	
	407	337	407	70	70,5		392	258	392	134	132,5
h'	405	292	405	113							
	405	295	405	110							
	405	292	405	113	112						

Tabelle No. II.

Abstand 300 mm. Nullp. 470.

Ton	σ_0	σ_1	σ'_0	$\sigma'_0-\sigma_1$	μ	Ton	σ_0	σ_1	σ'_0	$\sigma'_0-\sigma_1$	μ
g''	433	389	433	(44)		b'	416	327	416	89	
	433	392	433	41			416	319	415	96	
	433	392	433	41	41		415	326	415	89	91,3
f''	433	370	432	62		a'	414	298	414	(116)	
	432	370	432	62			414	303	414	111	
	432	371	432	61	61,7		414	303	414	111	111
e''	432	366	432	66		as'	416	341	413	(72)	
	432	370	432	62			413	328	413	85	
	432	368	432	64	64		413	327	413	86	85,5
es''	432	385	430	45		g'	414	360	414	(54)	
	430	385	430	45			414	356	414	58	
	430	385	430	45	45		414	355	414	59	58,5
d''	431	337	429	92		ges'	413	342	413	(71)	
	429	339	429	90			413	347	413	66	
	429	338	429	91	91		413	347	413	66	66
des''	429	333	427	94		f'	413	365	413	48	
	427	331	426	95			413	365	413	48	
	426	329	426	97	95,3		413	365	413	48	48
c'	426	340	426	86		e'	413	348	413	65	
	426	342	426	84			416	350	414	64	
	426	340	426	86	85,3		414	349	414	65	64,7
h'	427	289	417	128							
	417	289	416	127							
	416	288	416	128	127,7						

Tabelle No. III.

Abstand 200 mm. · Nullp. 470.

Ton	σ_0	σ_1	σ'_0	$\sigma'_0 - \sigma_0$	μ	Ton	σ_0	σ_1	σ'_0	$\sigma'_0 - \sigma_0$	μ
g''	425	285	425	(140)		b'	408	283	406	123	
	425	284	425	141			406	281	406	125	
	425	284	425	141	141		*419	284	406	122	123,3
f''	425	325	424	99		a'	*417	252	404	152	
	423	324	423	99			404	255	404	149	
	423	324	423	99	99		404	252	404	152	151
e''	423	325	421	96		as'	402	270	402	132	
	421	322	421	99			401	268	401	133	
	421	323	421	98	97,7		*411	268	403	135	133,3
es''	419	333	419	86		g'	401	242	401	159	
	419	330	419	89			403	242	402	160	
	419	332	419	87	87,3		*418	228	401	(173)	159,5
d''	418	312	417	105		ges'	409	300	409	109	
	415	309	415	106			409	301	409	108	
	415	308	415	107	106		*420	298	412	(114)	108,5
des''	415	351	415	64		f'	412	347	415	(68)	
	415	350	415	65			415	354	415	61	
	415	351	415	64	64,3		415	352	415	63	62
c'	415	315	414	99		e'	417	336	417	81	
	414	320	414	94			417	339	417	78	
	414	312	414	102	98,3		417	338	417	79	79,3
h'	414	269	406	137		e''	414	300	418	118	als
	406	273	406	133			418	309	421	112	Contr.
	*415	271	406	135	135		421	318	421	103	s. ob.

Tabelle No. IV.

Abstand 100 mm. Nullp. 470.

Ton	σ_0	σ_1	σ'_0	$\sigma'_0-\sigma_0$	μ	Ton	σ_0	σ_1	σ'_0	$\sigma'_0-\sigma_0$	μ
g''	420	64	438	(374)		b'	425	263	421	158	
	438	76	440	364			421	264	421	157	
	440	80	440	360	362		420	264	421	157	157,3
f''	440	311	440	129		a'	421	213	415	(202)	
	440	302	439	137			415	221	413	192	
	439	308	439	131	132,3		413	218	413	195	193,5
e''	439	286	435	149		as'	413	250	413	(163)	
	435	290	435	145			415	246	415	169	
	435	286	435	149	147,7		415	250	415	165	167
es''	433	282	434	(152)		g'	415	202	410	208	
	434	287	434	147			410	203	410	207	
	434	287	434	147	147		410	200	410	210	208,3
d''	432	255	428	173		ges'	409	226	410	184	
	428	254	428	174			410	222	409	187	
	428	252	428	176	174,3		409	224	409	185	185,3
des''	427	277	427	(150)		f'	409	237	413	176	
	427	266	426	160			413	228	415	187	
	426	265	427	162	161		415	242	415	173	178,7
c'	426	308	426	118		e'	414	228	414	186	
	426	308	426	118			414	220	414	194	
	426	308	426	118	118		414	224	414	190	190
h'	426	260	425	165		g''	*414	088	436	348	zur
	425	261	425	164			436	78	438	360	Contr.
	425	261	425	164	164,3		438	84	438	354	s. ob.

Aus den Tabellen ersieht man, dass der **konstante** Ausschlag für ein und denselben Ton vor und nach der Schallerregung ziemlich derselbe (σ_0 gleich oder wenig verschieden von σ'_0), für verschiedene Töne aber verschieden ist.

Wir beobachten ferner, dass diese Ausschläge ziemlich gleichmässig bis zu einem Hauptwert wachsen, um von da an wieder in der gleichen Weise abzunehmen. (Tab. II, III, IV von g″ bis ges′ zunehmend, dann abnehmend.) Dieses Anwachsen und Abnehmen vollzieht sich in bestimmten Perioden.

Bläst man einen Ton ausser der musikalischen Tonfolge an, so stellt sich auch der für diesen Ton eigentümliche Widerstand ein. (Man sehe die den Tab. III u. IV angefügten Kontrollreihen für den Ton e″ resp. g″.) Je stärker der Ton, desto schneller findet diese Einstellung statt.

Da, wie wir wissen, die Erschütterung des Mikrofons eine Verminderung des Widerstandes zur Folge hat, so könnte man darin ein Mittel sehen, das σ_0 der tieferen Töne dem σ_0 der höheren anzupassen.

Der so künstlich verminderte Widerstand erhöht sich aber nach dem Aufhören der Schwingungen wieder auf den dem angeblasenen Tone charakteristischen Widerstand. (Man vergleiche σ'_0 mit σ_0 in den mit * bezeichneten Reihen der Tab. III.)

Die Grösse der konstanten Ausschläge ist daher keine willkürliche, sondern abhängig von der Art des erzeugten Schalles.

Noch augenfälliger wird diese Erscheinung,

wenn wir Töne verwenden, die in Höhe und Klangfarbe wesentlich verschiedener sind. So wurde abwechselnd der Ton d″ einer Holzpfeife und g‴ einer Glaspfeife angeblasen. Nach dem ersten Ton ergab sich ein Ausschlag von ca. 45 Skalenteilen, entsprechend einem Ruhewiderstand des Mikrofons von ungefähr 27 Ohm, nach dem letzteren ein Ausschlag von ca. 15 Skalenteilen = 20 Ohm.

Wir müssen uns daher den Vorgang so vorstellen. Die Glimmermembran wird von jedem Ton in eine ganz bestimmte Schwingungsart versetzt. Die auf ihr lagernden Kohlenkörner machen diese Schwingungen mit und suchen sich in einer Weise anzuordnen, wie dies ähnlich bei den Chladni'schen Klangfiguren sichtbar gemacht wird.

Bei der äusserst geringen Amplitude der schwingenden Membran und der relativen Schwere der Kohlenkörner wird zwar eine Trennung der Kontakte nicht eintreten, aber die Kohlenkörner werden, wenn durch die Oszillationen die Kontakte gelockert sind, das Bestreben zeigen, sich den Flächen kleinster Bewegung fester anzuschmiegen und in Ruhe nach diesen Flächen hin innigere Kontakte einzugehen. Daher die Verschiedenheit des Kohlenwiderstandes je nach der Schwingungsart der Platte oder je nach dem Ton.

Auf diesem eben geschilderten Verhalten wird auch in der Praxis der Vorteil für reine Tonübertragung bei Anwendung von Körnermikrofons beruhen.

Indes auch bei Mikrofonen, bei denen nur zwei Kohlen mit grösseren Berührungsflächen sich gegenüberstehen, zeigt sich das gleiche Bestreben nach dem Verklingen des Tones, dem Ton entsprechende Ruhewiderstände zu schaffen, nur tritt diese Eigenschaft viel undeutlicher in Erscheinung und entzieht sich dadurch in ihrer Gesetzmässigkeit leicht der Beobachtung, da die zwangsweise Lagerung der Kohlen einerseits nur geringe seitliche Verrückungen zulässt, und andererseits der unstatthaften Lösung des Kontaktes durch einen stärkeren Druck vorgebeugt werden muss.

Auf diesen Umstand glaube ich es auch zurückführen zu dürfen, wenn Oberbeck bei seinen Versuchen mit dem Mikrofon von Lüdtke für musikalische Töne „inkonstante Resultate“ erhielt. Denn Versuche, die für ein und dieselbe Tonreihe zu verschiedenen Zeiten angestellt werden, zeigen nur dann übereinstimmende Resultate, wenn die Kontakte zwanglos die Möglichkeit haben, sich in gleicher Weise wie früher der gleichen Schwingungsform anzupassen.

So gab auch unser Mikrofon, wenn es längere Zeit ausser Gebrauch war — d. h. wenn es durch Erschütterungen und Geräusche verstimmt war — erst dann mit früheren Messungen vergleichbare Resultate, als sich nach einer längeren Reihe von Tönen wieder der von früheren Beobachtungen her bekannte Widerstand für einen bestimmten Ton eingestellt hatte.

Schneller lässt sich das gewünschte Ziel erreichen, wenn man einen Ton aus grösserer Nähe längere Zeit stark anbläst.

Um ein Bild über die in Tabelle I—IV erhaltenen Werte von μ zu erhalten, sind dieselben in einem Koordinatensystem mit Verkürzung der Ordinaten aufgetragen und der Einfachheit halber durch Linienzüge verbunden.

Man müsste nämlich, um die Kurven annähernd richtig zu zeichnen, zwischen zwei Tönen noch viele Punkte bestimmen, indem geringe Verrückungen des Stempels grosse Intensitätsänderungen hervorbringen können.

Sind aber — wie zu erwarten ist — die für die ganzen und halben Töne bei verschiedenen Entfernungen erhaltenen Linienzüge unter sich äquidistant, so werden auch die die einzelnen Punkte verbindenden Kurven äquidistante sein.

Dass diese Tendenz vorhanden, sieht man aus der Betrachtung der Figur. Leider aber werden die Resultate dadurch getrübt, dass sich in geschlossenen Räumen die Schallwellen zu Systemen stehender Wellen ausbilden, abhängig von der Gestalt des Raumes und der darin befindlichen Gegenstände.

So sehen wir, dass Töne, die in einer Entfernung von 400 mm erzeugt wurden, durch Reflexion Verstärkungen erfahren haben und intensiver in ihrer Wirkung auf das Mikrofon sind als dieselben Töne in einer Entfernung von 300 und 200 mm (ges′, f′, es′).

Entfernt man sich mit der Tonquelle noch weiter, so treten diese äusseren Beeinflussungen noch mehr hervor. Die Tonquelle wurde daher für die folgenden Untersuchungen in einem Abstand von 200 mm gehalten.

Zunächst waren es locker aufgeschichtete pulverförmige Substanzen, welche zwecks ihrer Durchlässigkeit für Schallwellen geprüft werden sollten.

Die Anordnung war so getroffen, dass der Apparat mit seinem offenen Ende in eine grössere Porzellanschale tauchte, die nun mit den betreffenden Substanzen gefüllt wurde.

Der Ton wurde oben seitlich erzeugt. Die Schallwellen waren daurch gezwungen, ihren Weg durch die aufgeschüttete Schicht zu nehmen, bevor sie zum Schallempfänger gelangten.

Die Richtung des aus der Schicht austretenden Schallstrahles ist also durch diese Anordnung parallel und entgegengesetzt der Richtung des einfallenden.

Schon beim Auftreffen auf die Substanz wird ein Teil der Schallenergie reflektiert (oder in Wärme umgesetzt) werden. Dieser Vorgang wiederholt sich bei jeder neuen Lage. Von den Schallwellen gelangen endlich nur die in den Apparat, welche durch wiederholte Reflexion eine derartige Richtung angenommen haben, dass sie in dem Luftraum unter dem Mikrofon austreten können.

Bei diesem verwickelten Prozess ist eine bedeutende Schallschwächung ohne weiteres zu er-

warten. Dies bestätigt auch der Versuch. Die Schale wurde z. B. mit trockenem Formsand bis zu einer bestimmten Marke gefüllt und auf einem Stativ so unter den Apparat gebracht, dass dessen unterer Rand eben die Sandschicht berührte. Dann wurde der Sand noch 1 cm hoch aufgeschüttet. Die Ausschläge waren sehr gering und betrugen für den bevorzugten Ton g′ nur 12, während bei ungefüllter Schale 356 Skalenteile erreicht wurden.

Erhöht man die Sandschicht nur noch um ein weniges, so tritt bald der Moment ein, wo das Dynamometer überhaupt nicht mehr reagiert.

Während aber das eingeschaltete Telefon den Durchgang der Schallwellen noch deutlich erkennen lässt, ist selbst mit diesem hochempfindlichen Instrument kein Ton mehr zu hören, wenn man die Schale mit Flüssigkeiten, z. B. Wasser, füllt.

Wir haben hier den Fall der totalen Reflexion vor uns. Dies stimmt auch mit der Theorie überein und bestätigt die von Rayleigh[1]) nach Analogie der optischen Reflexion abgeleitete Formel:

Wir erhalten darnach für die Amplitude der reflektierten Welle

$$\frac{\varphi''}{\varphi'} = \frac{\frac{\varrho_1}{\varrho} - \frac{\operatorname{cotg}\vartheta_1}{\operatorname{cotg}\vartheta}}{\frac{\varrho_1}{\varrho} + \frac{\operatorname{cotg}\vartheta_1}{\operatorname{cotg}\vartheta}}$$

[1]) Rayleigh, Die Theorie d. Schalles. Übersetzt von Dr. Fr. Neesen. Braunschweig. Bd. II. 1880, p. 97—98.

und, berechnet für unseren Fall, dass das obere Medium Luft unter atmosphärischem Druck und das untere Wasser ist,

$$\frac{\varphi''}{\varphi'} = \frac{1 - 0{,}0003\sqrt{1 - 17{,}5\,\mathrm{tang}^2\,\vartheta}}{1 + 0{,}0003\sqrt{1 - 17{,}5\,\mathrm{tang}^2\,\vartheta}}$$
$$= 1 - 0{,}0006\sqrt{1 - 17{,}5\,\mathrm{tang}^2\,\vartheta}$$

woraus man ersieht, dass selbst bei senkrechtem Auftreffen, also für $\vartheta = 0$, die reflektierte Welle nahezu dieselbe Intensität wie die einfallende besitzt, was einer nahezu vollkommenen Reflexion entspricht.

Ich möchte an dieser Stelle eine Erscheinung nachholen, welche bei der Auffüllung der Schale mit Flüssigkeiten selbstverständlich ist, bei den gepulverten Substanzen aber anfänglich befremdete.

Der konstante Ausschlag wurde so gross, dass die Skala aus dem Gesichtsfelde verschwand. Der Grund liegt darin, dass selbst durch das Einbringen von Sand in die Schale ein Überdruck in dem Luftraum unter dem Mikrofon erzeugt wird. Es wurde deshalb auf dem Deckel des Apparates ein Hahn angebracht, der die Luft im Innern mit der äussern ins Gleichgewicht zu setzen gestattete, wenn durch die den Verschluss bildenden Materialien der Druck im Innern gestiegen war.

Als solche wurden (3.) feste Körper in Untersuchung gezogen. Dieselben wurden ausnahmslos in der Form kreisförmiger Platten angewandt und durch Schrauben an dem Apparat befestigt. Ein Gummiring dichtete die Auflagerfläche ab.

Die hauptsächlich untersuchten Körper und die dafür erhaltenen Resultate bringt die Tabelle V und teilweise auch das Kurvenblatt No. II.

Die Reihen wurden analog den früheren erhalten und sind die Zahlen Mittelwerte aus mindestens 3 Beobachtungen.

Vor allem ist klar, dass die Intensität der Luftbewegung in dem nun abgeschlossenen Raum nur abhängt von den Dimensionen, den Elastizitäts- und Dichtigkeitsverhältnissen der abschliessenden Platte.

Hartelastische Platten haben nur für eine beschränkte Anzahl von Tönen die Fähigkeit, sich leicht in einzelne entgegengesetzt von einander schwingende Abteilungen zu zerlegen; hierfür wird die Luftbewegung hinter der Platte am grössten, dementsprechend auch die Ausschläge am grössten. In den Hauptausschlägen begegnen wir also einem Eigenton der betreffenden Platte.

Aus dem übrigen Verlauf der Kurve — die wir uns durch Vergrösserung des Tongebietes weiter fortgesetzt denken können — lässt sich ein anschauliches Bild gewinnen über das „Arbeiten" einer Platte und in Verbindung mit der Kurve I wertvolle vergleichende Aufschlüsse über ihre Brauchbarkeit, z. B. für telefonische oder mikrofonische Zwecke.

Die Resultate für die Kurve I wurden bei geöffnetem Apparat erhalten. Für diesen Fall sind die Intensitätsschwankungen für verschiedene, aber

Tabelle No. V.

		Apparat geöffnet	Apparat verschlossen mit Platten aus						
			1. Ahorn	2. Kork	3. Blei	4. Eisen	5. Eisen	6. Guttapercha	7. Blei mit konc. Öffnung
Dicke der Platte		—	3,3	2,2	1,65	0,125	0,55	0,08	
Angeblasene Töne	g″	100	8	7	3	15	7	118	307
	f″	105	20	17	5	39	21	289	ca. 700
	e″	77	18	13	2	33	9	181	100
	d″	97	0,5	68	1	50	9	117	104
	c′	87	12	86	6	85	4	119	97
	h′	142	8	90	10	129	0,5	172	133
	a′	149	4	60	0	475	2	195	208
	g′	181	9	40	0,5	170	29	220	220
	f′	96	4	109	1	90	4	146	84
	e′	105	6	6	0	75	1	132	79
	d′	87	6	4	0	29	0	98	65

gleich stark angeblasene Töne — abgesehen von den Raumbeeinflussungen — nur von den Eigenschaften der Glimmerplatte des Mikrofons abhängig. Diese Schwankungen sind jedoch im Hinblick auf die, welche zum Beispiel durch eine Eisenplatte (Kurve II) hervorgerufen werden, nur gering, und es zeigt sich daraus deutlich der Vorzug, den die Verwendung von Glimmer der Eisenplatte gegenüber mit sich bringt.

Im Gegensatz zu den Platten aus Metallen giebt uns die Kurve III die Resultate für eine weichelastische Guttaperchaplatte.

Während bei den Platten der ersteren Gattung eine Verstärkung nur für den Eigenton eintritt und auch nur hierfür unsere Vergleichskurve überschritten werden kann, findet bei diesen gemäss ihrem leichten Anpassungsvermögen für Töne von beliebiger Schwingungszahl eine Verstärkung für die ganze Reihe der benützten Töne statt. Die Kurve III bewegt sich in allen Punkten über unserer Normalkurve.

Wir erhalten auf diese Weise die bemerkenswerte Thatsache, dass es uns möglich ist, durch Verschluss eines Raumes mit einer weichelastischen Membran im Innern dieses Raumes eine grössere Tonintensität zu erhalten, als wenn die Schallwellen ungehindert eindringen.

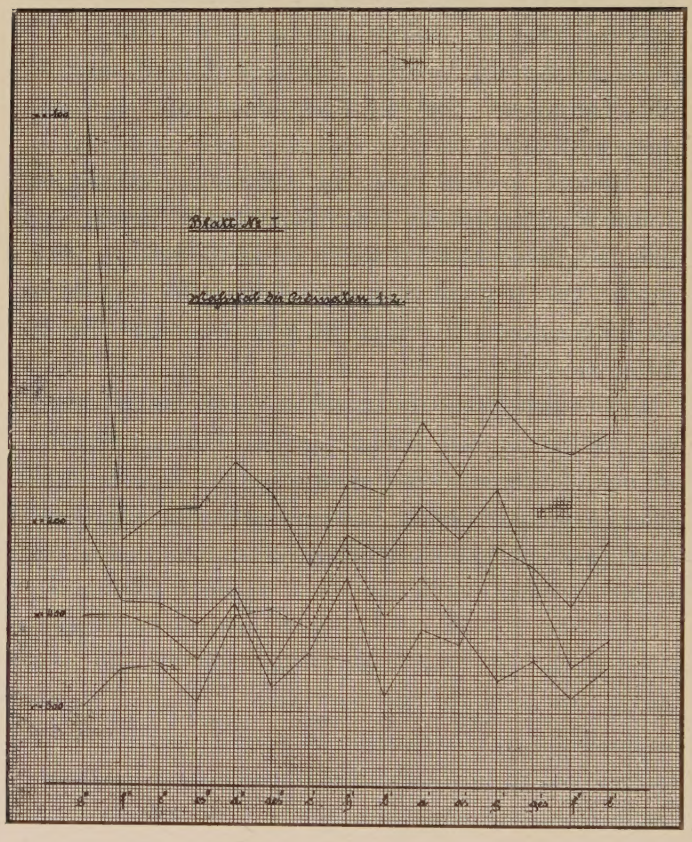
Ob hierbei die Klangfarbe eine Veränderung erleidet, muss anderen Versuchen überlassen bleiben. Die Ähnlichkeit aber der Kurven II und III lässt

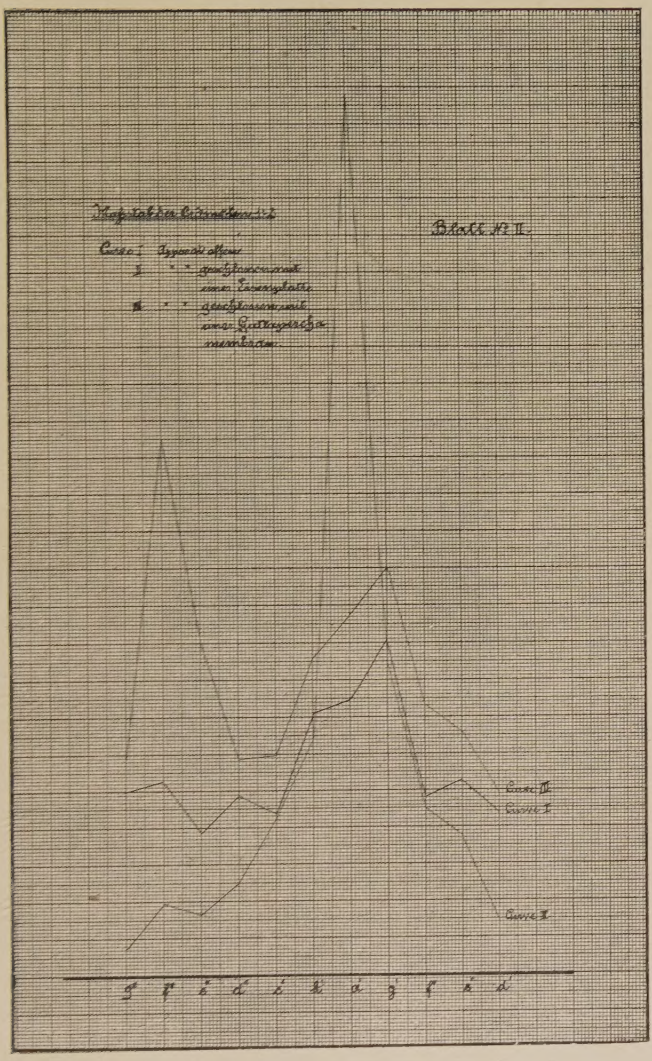
ziemlich sicher vermuten, dass die Klangverhältnisse nicht wesentlich andere geworden sind.

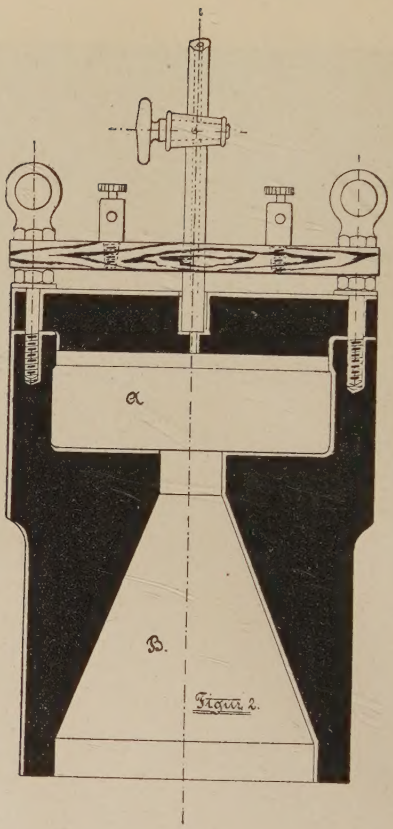
In der letzten Kolonne der Tabelle V ist noch eine Versuchsreihe angeführt, woselbst statt einer vollen Platte eine solche mit einer centrischen Öffnung angewandt wurde. Auf diese Weise entsteht ein Resonator, der auf den Ton f′ am stärksten anspricht.

Durch Veränderung der Öffnung und schrittweise Verkleinerung des Innenraumes lassen sich alle möglichen Abstufungen erzielen, wodurch wir in den Stand gesetzt sind, aus einer Tonkombination unschwer die einzelnen Komponenten herauszufinden.

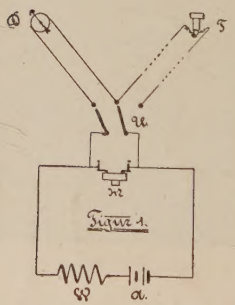
Bei der grossen Verstärkung (ca. 700 Skaltle.), die der Ton durch diese Resonatorwirkung erfährt, eignet sich diese Art von Versuchen auch mit weniger empfindlichen Instrumenten zur objektiven Vorführung vermittelst Projektion.




Blatt № II.
Curve I
Curve II
Curve III



Figur 2.



Figur 1.